

# 物理探査の方法

## 地震探査

地震探査の技術は 応用理学として数学や物理学などの基礎的学問と電子工学 機械工学 化学工学などの近代工学の技術の総合によって成立しているものである。

それらの部門の最近における革新的な技術の進歩は直接または間接的に地震探査技術を促進させてきている。

また一方 地震探査技術は探査をしようとする対象と密接に関係するものであり 平原下深部における石油・石炭の探鉱・開発 また自然的立地条件を克服しようとする近代的土木工事は 地震探査結果に広範なかつ詳細な資料を要求し 地震探査技術の質的發展を促進している。このようなモーメントによって 地震探査技術は急速に発展してきたが それらの中から最近の話題をいくつか拾って説明してみよう。

もちろん ここで述べるものがすべてではなく またとくに重要なものというわけでもない。これらのトピックのかけにあって 広大な技術のそれぞれの分野において 開発改善しているじみちな努力が 技術の経済的有用性を増進させる重要な役割りを果しているのである。

地震探査の反射法において 磁気録音方式による地震探鉱機 (写真①) という画期的な器械の発展が行われた。

従来の電磁オシログラフ方式地震探鉱機では 1回の火薬の爆発によってただ1枚の記録しかとれず 反射波をとり出すためのフィルターなどの操作も1回の爆発について1種類しか行うことができなかった。

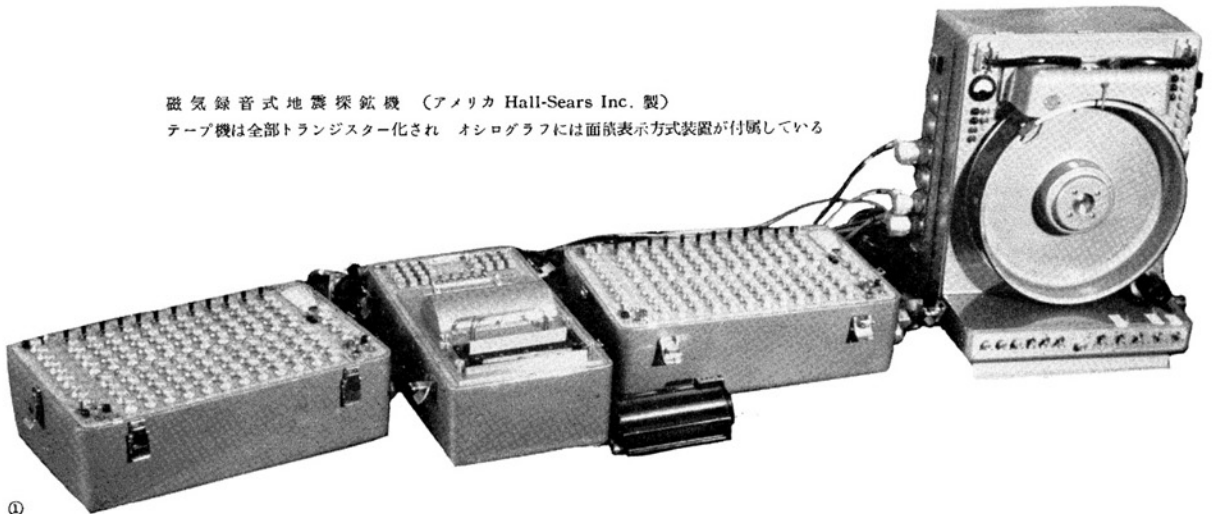
それ故 地下構造の情報も限られたものしか取れなかった。戦後の電子工業における磁気録音方式の発達はこの従来の欠陥を克服し すべての情報をいったんテープに録音し 幾度も再生可能な状態に記録をとることに成功した。その結果 反射波を検出する操作も火薬の爆発を何回も行うことなく テープから繰り返し地震動を再生して行うことができるようになった。

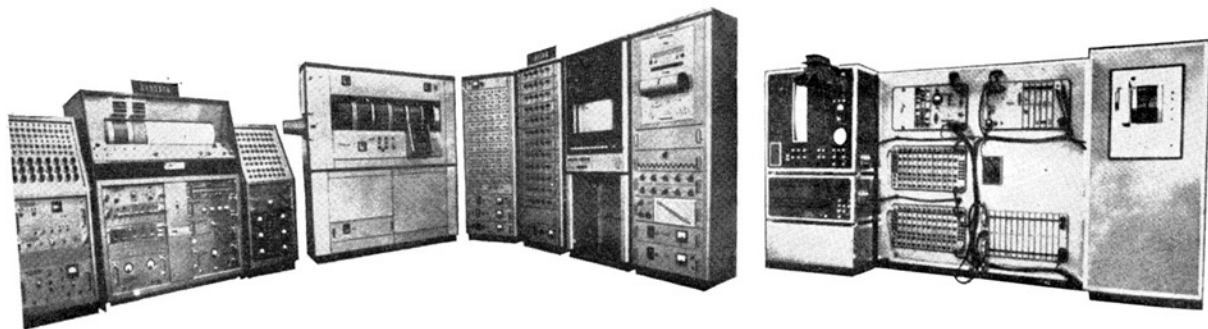
これによって地震記録の中に含まれる情報もれなく利用されるようになると共に データの新しい処理方式の開発を促した。

そして数年をいわずして 磁気録音方式探鉱機の姉妹として 解析用再生機 (Playback Machine) (写真②) が出現した。この解析用再生機はテープの中に含まれる情報をより多く また正確に検出すると共に解析に便利な形に記録を処理する機能をもっている。

その結果 地震探査の内容は飛躍的に増大し ますます

磁気録音式地震探鉱機 (アメリカ Hall-Sears Inc. 製)  
テープ機は全部トランジスター化され オシログラフには面積表示方式装置が付属している





② 解析用再生機 (ドイツ Prakla 製)  
三種類の解析用再生機を集めてデータの処理を行っている

す探鉱のむずかしい地域へと追い込まれている石油探鉱の要求にこたえてきている。

電子工学・機械工学における最新の技術によって製作されたこのシステムは 地震探査技術を本質的に発展させ 従来の方式では求めることのできなかつた情報までが求められ 有効に使用されるようになってきた。

このシステムは データ処理に対して無限の可能性を開いたもので 新しいデータ処理の方法をつぎつぎと開発しつつある。

しかし いまだ1つの再生機で全ての機能を有するという機械はなく データ処理の方式と目的に応じて種々の機能をもったタイプが研究されている。

解析用再生機の現在の段階における機能としては

- (1) 面積表示 濃淡表示方式等による記録断面図の作製
- (2) 種々の混合操作 (Compositing)
- (3) 記録の伸縮

(4) 時間補正

(5) 時間領域フィルター

等であるが これらの機能を利用した新しいデータ処理の技術を いくつか説明してみよう。

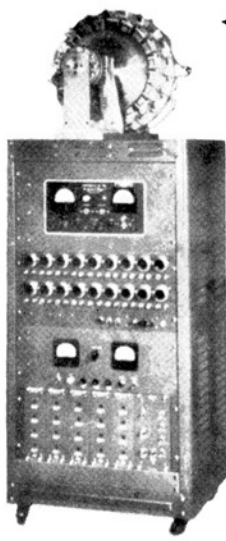
**面積表示方式による記録断面図表現 (写真③)**

従来の単1スポットによる地震記録は 反射波の検出に最も適した表現方式ではなく 振動振幅を光度変化に変換した濃淡表示方式や 写真③ にみられるような原波形を残した面積表示方式によって記録を表現すると 反射波の検出がものすごく良くなる。この方法によって従来十分利用されていなかった情報までも 有効に使用できるようになった。

たとえば 石油の集積に重要な意味をもつ断層に関する情報や 複雑な地下構造に由来する交錯する反射波や 石油地質技師の念願であった 地下深部構造の情報などが 従来以上に求められることになった。

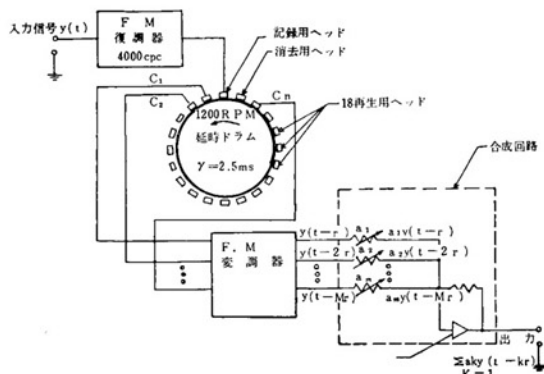


③ 面積表示方式による記録断面図の一例  
地下深部まで反対面が追跡される

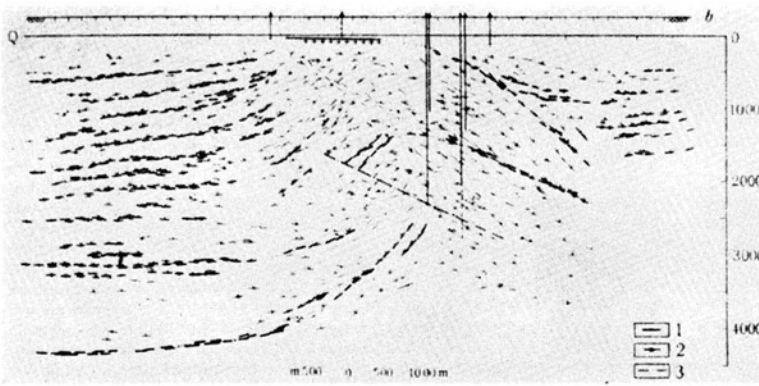


④ 時間領域フィルター (Time Domain Filter)

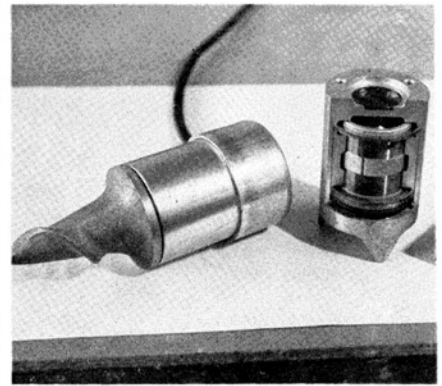
← 上部の円板状のものが磁氣的遅延装置で 時間の遅れを与えてサンプリングする  
下部のシャーシの中に加算装置 コントロール装置が入っている



⑤ delay line filter の模式図



⑥ 方向統御法による地震断面図の一例(ウラルアクチベンスリ地方) 方向による反射波の検出統御によって得られた反射法地下構造断面図 従来のもの に比べて多数の反射波が検出され また急傾斜の反射面も得られている



⑦ 2つのコイルを利用して高圧線からの誘導を打消した受振器 地震探査を実施する地域に高圧線や電灯線が通っているところでは有効である この型式で固有周波数 4.5m までのものができている (アメリカ Hall-Sears Inc. 製)

**時間領域フィルター (Time Domain Filter)**

(写真④・⑤)

従来地震振動の中から 反射波を検出する操作として 電気的フィルターが使用され 周波数領域(Frequency Domain)における フィルター作用の 概念によって情報の選別が行われてきた。

電気的フィルターの操作が 時間領域におけるサンプリング合成の操作によって行われることから また 従来時間領域で行われていた 統計学的思想から発展した信号検出の操作が 周波数領域におけるフィルター作用と等価であることが認識されてから 時間領域におけるフィルター作用が より一般的なフィルター操作として行われることが分ってきた。

この時間領域における広い観点から 反射波検出の新しい方法が 現在盛んに開発されつつある。

海上地震探査で多く表われる 重複反射を消去する方法 が開発され また 反射波のパイロット信号と地震記録の中に含まれる反射波との相関に着目して 反

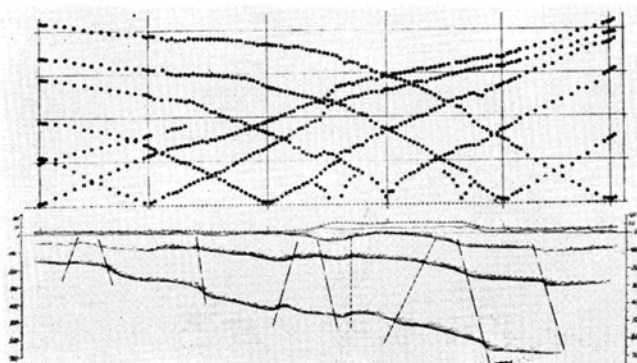
射波を検出しようとする 相関フィルター (Correlation Filter) が開発されている。

この時間領域におけるフィルター操作は 従来電気的に不可能であった種々のフィルター作用を 実現可能ならしめたため 単に地震探査だけではなく 広く他の振動測定分野にも 普及していくものと期待されている。

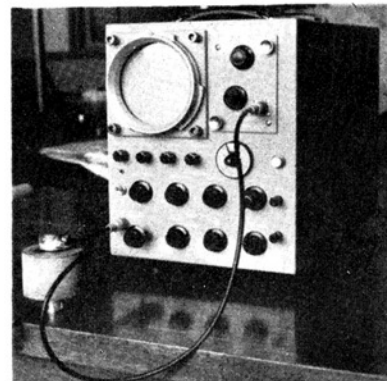
**方向による反射波の検出統御 (Controlled Directional Reception)** (写真⑥)

複雑な地下構造においては 色々の方向から反射波が到来するため 反射波が交錯したり または急傾斜の反射波が表われたりして 反射波の検出が困難になり 従って 地下構造の解明も困難になってくる。これらの反射波を検出するために 方向別に反射波の有無を判別する方法が開発された。

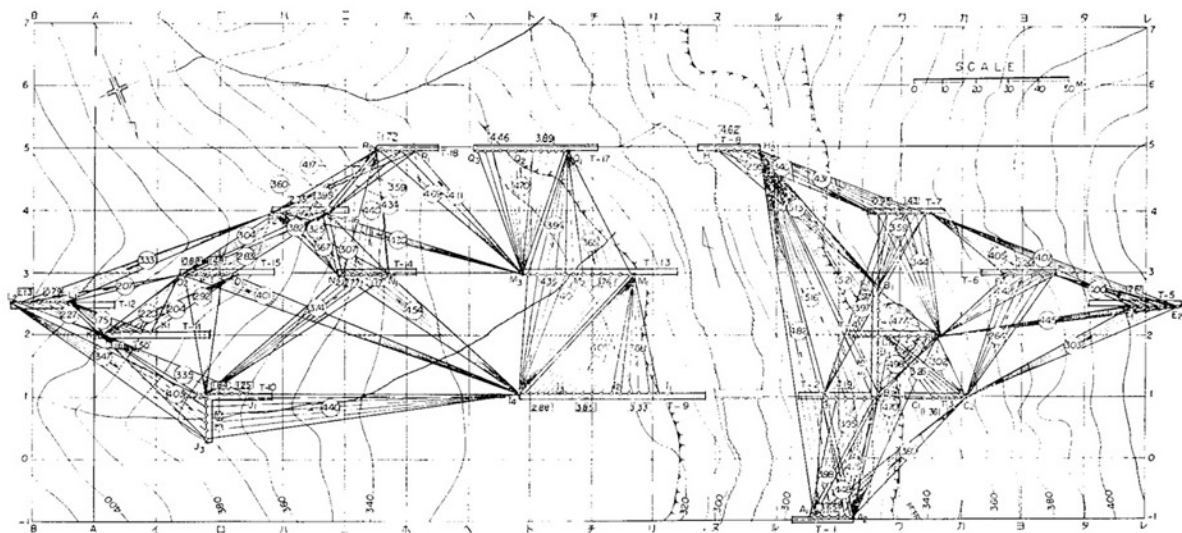
解析用再生機による表現方式や この方向による反射波検出統御方式は 約20年前すでに実験が行われ 有効性が実証されたものであるが 当時の機械製作の技術水準では 物理探査技術者の思い通りの操作を行うような



⑧ 電子計算機によって求められた地下構造断面図 断層を伴う複雑な地下構造も 電子計算機によって 速かに解析されるようになった 小さい波面が各受振点毎に計算される



⑨ 岩石をつたわる弾性波の速度測定器 超音波パルス方式による強力な出力によって ほとんどの岩石について速度が求められる 波の伝播時間は ブラウン管上で直視みもできるし また写真にとることもできる



⑨ ダムサイト横坑を利用した岩盤内の速度測定の一例横坑を利用して縦横に速度を測定する

機械の製作が無理であって 長い間 他の電子工学 機械工学の技術の進歩を待っていたもので 一般的科学技術の進歩と共に 最近非常な勢いで発展してきたものである。

地震探査屈折法において 最近ついに **電子計算機による地下構造の解析法**が完成した。(写真⑩)

従来 走時曲線から地下構造を解析するのに図式解法が行われてきたが 図式解法は解析に長い時間がかかり またそのため 解釈の多意性についての検討も 思うように行われ得なかった。

この電子計算機による方法は 走時曲線と地下構造とに関する長年の経験を集約し 理論化することによって 成功したもので 走時曲線の諸性質を明確にすると共に 屈折法の有用性をさらに倍加するものである。

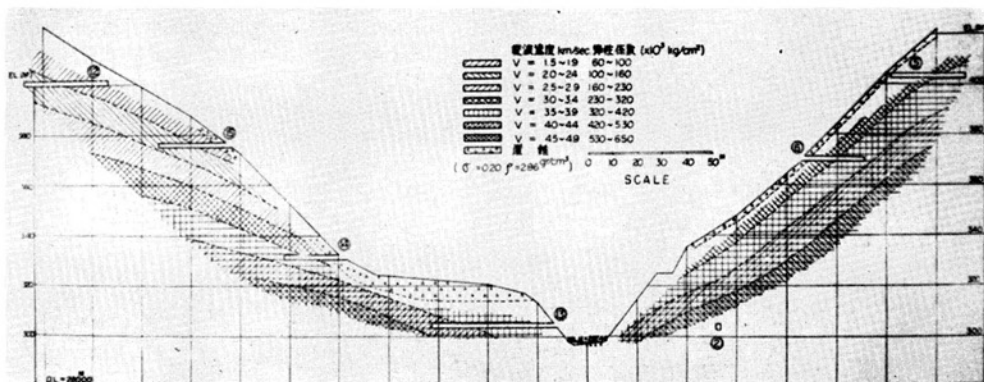
土木関係における地震探査の実施は 最近その利用度が著しく普及すると共に 地震探査のデータを土木工事

の設計 施工計画に直結させる必要が生じてきている。

この要求にこたえるため **岩石の物理性**の研究が盛んになり 地震探査の基礎データである弾性波の速度と 弾性的な性質および地質のデータとの関係づけについて研究が行われてきている。

**岩石の速度測定**(写真⑨)をサンプルについて行うだけでなく 横坑を利用して **岩盤内の速度分布**(写真⑩)を求める技術も開発されてきた。

地震探査の最近の技術の動きとしては 上記のほかに 全部 トランジスター化された探査機 高圧線からの誘導が絶無である受振器(写真⑦) 高性能の爆破孔孔機 速度検層機とそのデータの利用 群設置法・多孔爆発法の理論およびルーチン化の進歩 地震源としての爆薬の進歩 火薬に代る機械的震源 弾性波の発生機構の研究 地震波動の模型実験 表面波の性質の研究 等々 さまざまな技術上の発展がある。



⑩ 岩盤内の速度分布から弾性的性質が区分される一例

# 音波探査

超音波の性質を利用した機械として 従来 一般には 測深機 魚群探知機 探傷機などがよく知られている。

また これの物理探査方面の応用もかなり以前から研究されていた。たとえば 速度検層機 (Velocity logger) と呼ばれる機械は坑井を利用して 深さとともに各地層の速度が変化する模様を 連続的に記録していく機械で これから地震探査の結果を地質的に解釈する際に 必要な資料を求めることができる。

また 現地で採取した岩石資料に超音波を通して その伝播時間から岩石の速度を出すような装置もできている。これらはいずれも直接発振器→媒質(地層・岩石)→受振器の経路を通る波—直接波—を利用しているのであってその伝播距離も小さい。

ところが最近 超音波よりさらに低い音波領域の波を発生させ 地層を通ってきた波を記録する方法が考えられ これが各方面から注目されている。しかし 残念ながらこの方法は 現在のところ海底下の地質構造調査に限られている。これは水中が音波の発生にはなはだ都合のよい物理的環境にあるからである。

次に この方法について説明しよう。

この方法は 原理的には測深機の発振エネルギーを大きくしたようなものと考えて大差ない。事実 この方

法の発展途上においては 測深機で用いられているような磁歪型発振子が多く用いられたことがあり また 現在でも一部ではこれを用いている。(Sonoprobe)

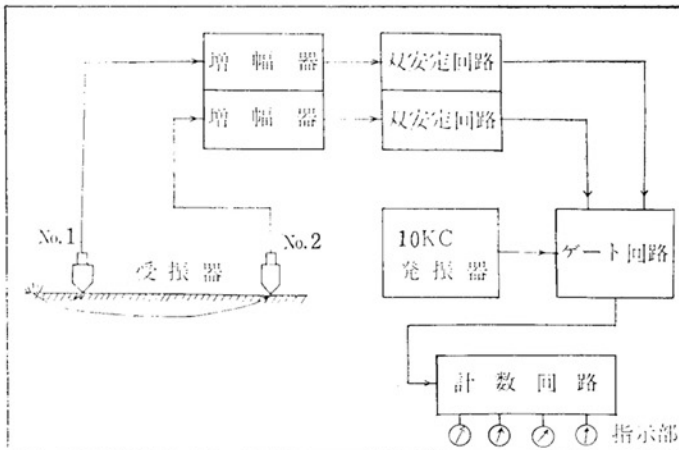
しかし 測深機における発振周波数領域をそのまま用いたのでは 周波数が高すぎるために海底堆積物中のエネルギーの減衰が多く 地下深部に波が浸透しないので 地下探査の目的にはそわない。

そこで最近では発振源として水中放電 (Sparker) またはガス爆発 (Gas Explosion) が用いられるようになった。

これらの方法によると 第1表に示すように 100~10,000 c. p. s. 程度の周波数幅を持った比較的低い周波数の音波を発生することができる。適当な放電回路または爆発装置を用いると このようにして発生した波は工業用雷管 1 本前後のエネルギーに相当し この結果海底下 100m 位まで波を浸透させることができる。

一方 第1表からわかるように 音波法は地震探査法に比べると 発振周波数が一ケタ高い。これは地震法よりも可探深度は浅いが 地下構造に対する分解能の高いことを意味する。また 発振を繰り返して最高(12/秒)連続して記録を画いていくので ちょうど地震探査法における受振器間隔をきわめて密にした場合に相当し(船の速度が4ノットの場合 0.5~2mおきに爆発したことになる)この意味からも分解能が高いわけである。

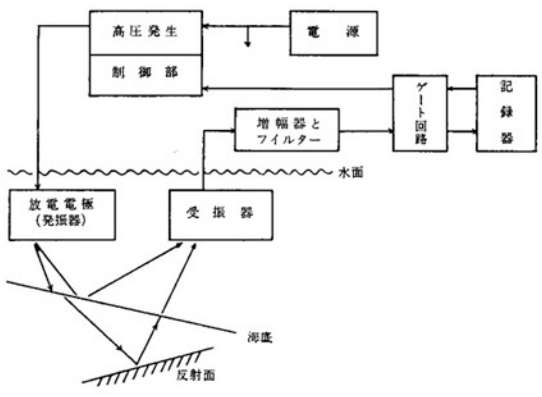
したがってこの方法は海底下比較的浅部の地下構造をできるだけ細密に調査する場合に適した方法と考えられる。また作業面から調査能率が非常によいこと 火薬



原 理 図

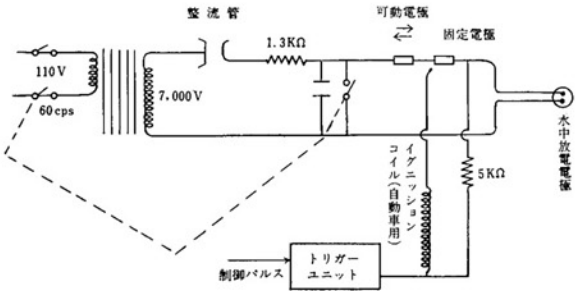
← 標準パルス発生器 (普通 10kc) の出力は ゲート回路を通して計数回路に接続されているが 常時ゲート回路は 絶縁状態にあるので パルスは計数部に伝達されない。いまハンマーその他により 岩石に衝撃を与えると 発振点近くに設置された受振器 No. 1 の出力により ゲートは導通状態に転ずるので 計数部はパルスを計数し始める。次に 地震波が受振器 No. 2 に到達すると 受振器出力は ゲートをふたたび絶縁状態に追い込む。従って 計数を終了し指示計は 2 点間を波が伝播するに要した時間を指示する。2 点間の距離は あらかじめわかっているので 直ちに速度を算出することができる。





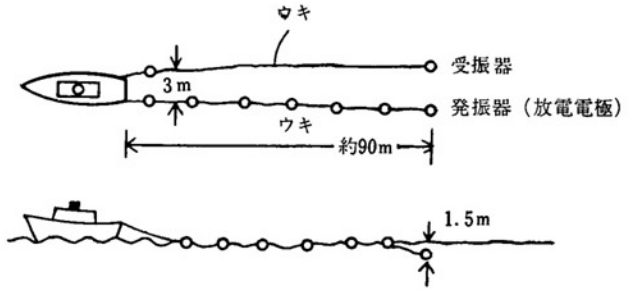
← 音波法のブロック図

測定装置の概要は 左図のとおりである  
 電源は 100V 60 c. p. s. の交流を発生し これをトランスで 約 7,000V に昇圧して整流する 整流した直流は コンデンサーに充電され 同期信号とともに放電電極で放電して音を発生する この同期の制御は 自動車用のイグニッション・コイルで小さい放電を起こし これですばい放電を制御するという巧妙な方法を用いている



放電部の回路概念図

受振された信号は前増幅器 濾波器 増幅器で増幅されてから記録器で書かれる 記録は湿式の紙に放電で書かれる



曳航図

船尾の後方約90mを曳航している これは船の雑音を避けるためである 総重量はエンジン共約1tである

第1表 スパーカーとの比較表

方法別区分	echo sounder	sparker	sono probe	地震反射法
発振周波数	2kc~50kc 中の単一周波数	100~10,000 c.p.s.	3,800 c.p.s. の単一周波数	5~300 c.p.s.
受振周波数	〃	100~10,000 c.p.s.	〃	20~100 c.p.s.
発振回数	15 sec	最大 12/sec	最大 16/sec	—
発振波指向性	有	ナ シ	有	ナ シ
探査可能深度 (海底下)	海底 (0m)	約 100m	約 70m	約 3,000m
エネルギー源	磁歪振動	水中放電	磁歪振動	火薬
受振器	磁歪受振器 (多くの場合発振と同じもの)	磁歪受信器	磁歪受振器 (発振と別なもの)	圧電・磁歪・振動板型等あり
記録法	連続	連続	連続	不連続
観測員 (測量を除く)	0	2 人	2 人	5~7人
漁業損害	ナ シ	ナ シ	ナ シ	有

速度計数装置

坑内に露出する岩石の速度 風化の程度等をおある程度定量的に測定することは土木・鉱山方面でしばしば要求される。このように岩石の賦存するそのままの状態では直接速度分布を求めるには 従来地震探査法が用いられてきたが 装置の複雑なことや 火薬 写真処理等を要する煩わしさから簡便

を必要としないので 漁業補償等の問題に煩わされないこと および 一隻の観測船ですむことなどが特長とされている。

地質調査所では アメリカの技術陣と協同して1959年 7月に有明海干拓工事のための基礎調査を この方法によって実施してきたが その後もこの方法の研究を進めている。

に利用することが困難な場合も多い。このような場合 概略の速度値を求める小型の装置が考案されている。

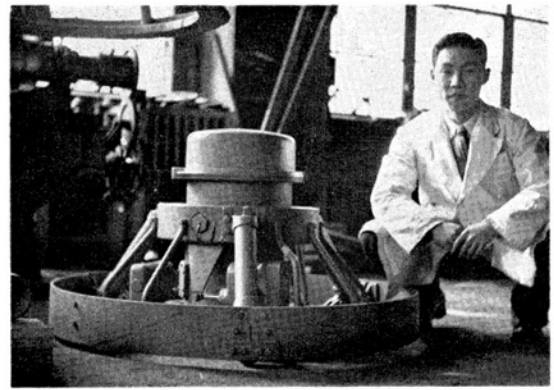
この方法はきわめて簡便ではあるが 波形を観測することができないので精度の点で なお今後研究の余地がある。地質調査所では この種の装置で波形観測のできる装置についても目下研究を進めている。

# 重力探査

精度の高い安定性のある重力計が重力偏差計に代って登場して以来 陸上における重力測定は 全世界において急激にまた広範囲に行われるようになった。

近年 重力計を海底におろし 船上から遠隔操作をすることによって 重力値と水深を測定する**海底重力計**が発達し 沿岸地帯における重力測定が広範囲に行われてきている。さらに 大陸棚における海底地下資源大陸から海洋にわたる地殻構造の究明のために広大な海域の重力分布の測定が必要となり 重力計を海底に沈めないで 動揺する **船の上** で重力値を測定しようとする研究が行われてきている。また 高空における重力場を測定するために **飛行機上** にて重力を測定する試験研究も行われている。

重力探査の解析は ここ数年来急速に発達してきている。地表で観測される重力値は 地下浅所から深部にわたるすべての物質によって定まるものであるから 地表の重力分布から 探査対象に対する有意な重力異常を選別しようとする方法が 余剰重力法 二次微分法 一次微分法などという解析法を生み出した。それらが一般的に サンプリングフィルターにほかならぬことからさらに すぐれたフィルターの操作を求める研究も行



ノースアメリカン製海底重力計の潜水鐘  
(この中に重力計が入っている)

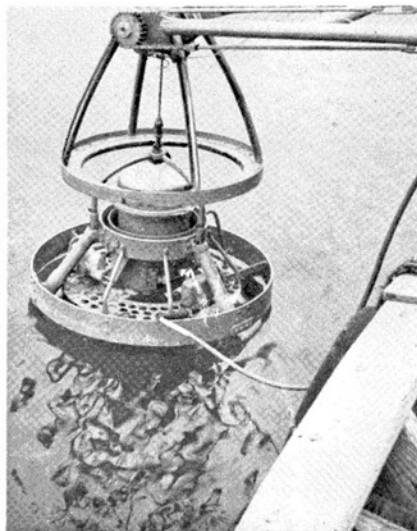
われている。

最近 **重力異常に対する定量的解析** が盛んになってきている。また **電子計算機の利用** によって 人間の行う計算では時間がかかり 不可能であった計算が短時間に行えるようになったため たとえば 地下構造を求めて速かに地表の重力値を計算したり また重力分布に適合する地下構造を求めたり また種々のフィルター操作を行って 地下構造との対応を調べるなど 定量的な結果を導こうとしている。

重力分布の定量的解析のもう1つの方向として 試掘井で得られる **岩芯の密度測定** を行い 各地層の密度によって重力異常を解釈しようとする方法が発展してきた。この方法は地下構造の推定のみならず 地層の堆積状況や 地下の構造運動の解析にも非常に有効な資料となり 重力探鉱が石油地質学において有用な資料になっている。



遠隔測定器



降下している海底重力計



電子計算機によって重力の解析計算が速に行われる  
重力のフィールドデータをカードにパンチして 電子計算機にかける と解析結果が印刷されてでてる これを図表にして地下構造との対比に使う

# 電気探査

## 電気探査の方法

1. Fe Cu Pb の硫化鉱物からなる塊状鉱体は母岩に比べてはるかに良導体である
2. これら硫化鉱物は大地内では電気化学的に不安定であるため 塊状硫化鉱床は局部的自然電位異常を呈する
3. これら硫化物が高抵抗の母岩中に鉱染する場合 鉱染鉱体は比較的大きな電気容量を示す
4. 母岩の比抵抗は岩石構造 間隙水分および 間隙水比抵抗によって定まるため 天然の岩石の比抵抗は  $0.5 \Omega\cdot m \sim 20,000 \Omega\cdot m$  の広い範囲にわたる値を示すたとえば 平均として粘土は  $0.5 \sim 50 \Omega\cdot m$  珪化帯は  $1,000 \sim 20,000 \Omega\cdot m$  の比抵抗を示し 岩石の種類および状態により 比抵抗に明瞭な差が現われる

このような種々の電気的特性を測定することにより 地下構造を探査するのが電気探査である。

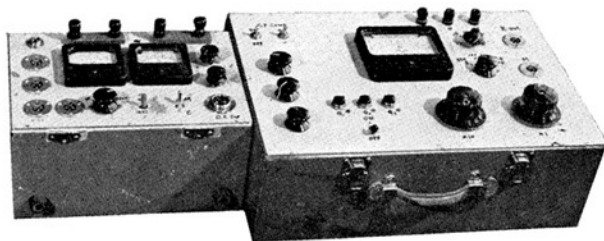
現在用いられている電気探査の方法には 自然電位法 比抵抗法 電磁法および誘導分極法等がある。

自然電位法は②の特性を 比抵抗法は④の特性 電磁法は①の特性を 誘導分極法は③の特性をおもなる対象として考えられたものである。

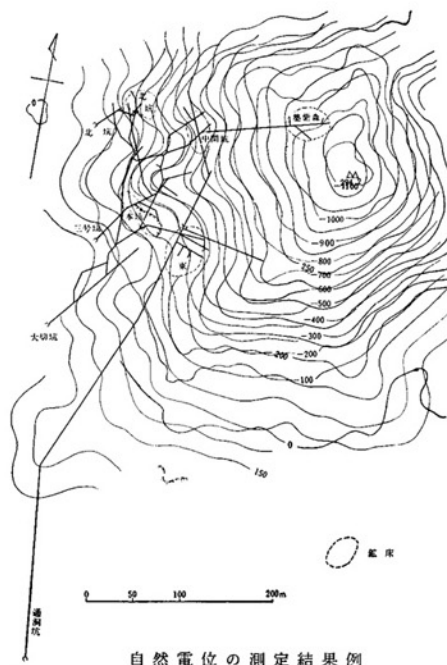
従って 自然電位法 誘導分極法および電磁法は直接鉱床を探査する直接法としておもに使用されるが 比抵抗法は構造探査を目的として用いられる間接法である。

## 自然電位法

この方法は周知のとおり もっとも広範に利用されている方法である。その理由は 測定操作がもっとも簡



電気探査器



自然電位の測定結果例

単であり かつ調査費用が低れんなことにある。

しかしながら 鉱床によって生ずる自然電位の異常の発生機構については いまだ不明確な点多く諸説がある。元来 本法は鉱床の電気化学的腐食過程に発生する局部電流によって 地表で観測される地電位異常を測定する方法として考えられたものであるが 腐食過程に及ぼす因子が数多いために 発生機構に対する一義的説明が困難である。

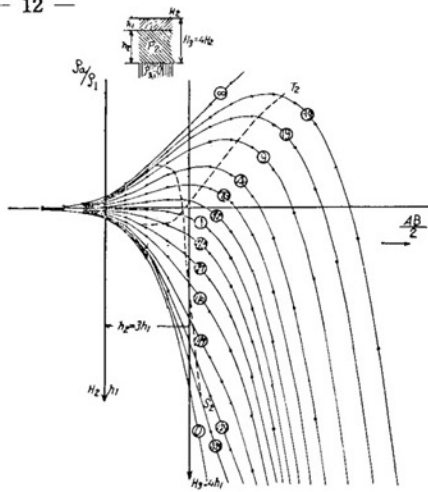
一方天然には 鉱床以外の原因による自然電位異常も多数存在するため 本法の調査結果解釈は一層困難となっている。本法の結果の解釈は他種の物理探査法および化学探査法の併用によるか ないしは地質学的資料にもとづいて行わねば適切なものとならない。また 図に示したように 鉱床は自然電位異常に直接対応せず 異常を示す等電位線の歪みに対応する場合もある。

## 誘導分極法

誘導分極現象はかなり古くから知られていたが 探査法として取り上げられたのは比較的新しい。金属鉱物と溶液の界面 粘土と外部溶液の界面に生ずる過電圧を測定し 鉱染状金属鉱床 粘土層の探査を行う方法である。定性的にはこれら鉱床 粘土層が誘電体として挙動する現象とみなしうる。

測定方式としては 時間領域で行う方式と周波数領域





← 垂直探査によって観測された探査曲線をこのような標準曲線と図式的に比較することによって解釈されるこの図は Schlumberger 法の三層標準曲線図葉の 1 例として示したもの

標準曲線の 1 例 (2層構造)

で行う方式とがあり 後者のほうが新しい。なお 本方法はアメリカおよびソ連でとくに発展しつつあるが わが国では いまだ少数の実験が行われた程度である。

**電 磁 法**

地下にある塊状金属体ないし金属鉱床に一次的交番電磁界を加えると 渦動電流による二次電磁界を生じ これを測定して良導体を探査する方法である。

可聴周波から高周波にいたる間の交番電磁界が使用されるが 探査深度を制御するため 60~500c.p.s. と 1,000~5,000 c. p. s. の二種の周波数を用いることがある。

なお 周波数の選択は対象物および調査地の地質条件を考慮して定められる。探鉱器としては Mac PHAR 社 SHARPE 社製のもの および Ore-Locator (C. G. G.) TVRAM (A. B. E. M.) 等があり 各測定方式を異にするが いずれも探査深度が浅いことが欠点である。わが国では探鉱器として一般に用いられるような測定器はいまだ製作されていない。

**比 抵 抗 法**

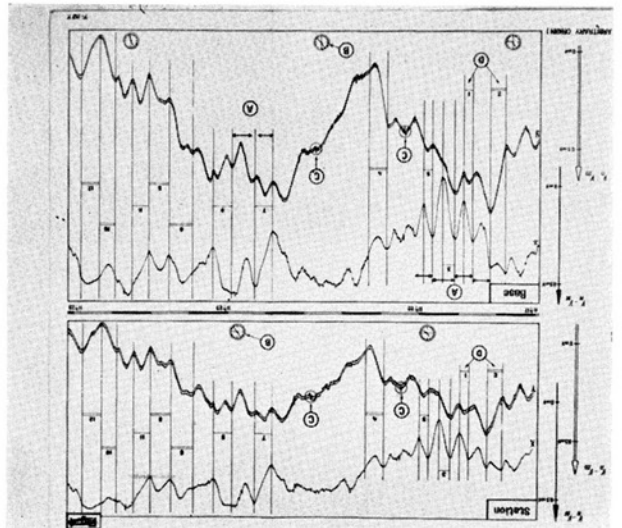
電気探査の主体をなす方法で 広範な問題の解決に役立つものであるが 鉱床・地下水等の直接探査に用いられることはきわめて少なく 主として構造探査に適用される。比抵抗法は地下の比抵抗分布を調べることにより 地質構造を求めめる方法であり 大別して 人工電源を用いる狭義の比抵抗法(人工電位法)と自然の地電流を利用する地電流法とに分けられる。

人工電位法には 水平方向の地質構造の変化を求め

ことを主眼とする水平探査と 垂直方向の構造の変化を調べる垂直探査とがある。前者においては 探査深度を一定に保ち測定上の各点における比抵抗分布を求めめるが 後者においては 1点において探査深度を変化せしめるときの比抵抗の変化から 垂直方向の比抵抗分布を調べる。なお 両者はしばしば併用される。水平探査はおもに断層帯 岩層の境界 変質帯の分布等の調査に 垂直探査は地下水 石油 金属鉱床並びにその他の有用資源に密接な関連をもつ構造の探査に用いられる。

地電流法は人工電位法と本質的な違いはないが 人工電流源の代りに 電離層 地球磁場 太陽活動と関連して生ずる地電流の短周期変化部を利用する。ために 電流透入深度を人為的に制御しえず その意味からは水平探査の 1種といいうる。いわゆる 地電流法(Telluric 法)は 15~30秒の周期の変化部に着目し 深部地盤構造の探査に利用される。しかしながら 地電流変化の周期と電流透入深度との間には密接な関連があり 着目する地電流変化の周期を変えることにより 探査深度の異なる結果を求めうる。

周期を考慮しつつ地電流の変化部の大きさを求める地電流法に Magneto-Telluric 法があり 深部探査の目的で 1秒以上の周期の地電流変化と 地磁気水平分力変化とを利用する。また 周期1秒以下の変化分を利用して 浅部構造探査を目的として考えられたものに AFMAG 法があり 測定は 10~500 c. p. s. 付近の地磁気の変化について行われる。



Telluric Current の測定結果の 1 例

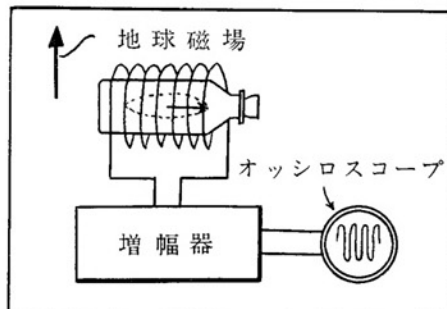
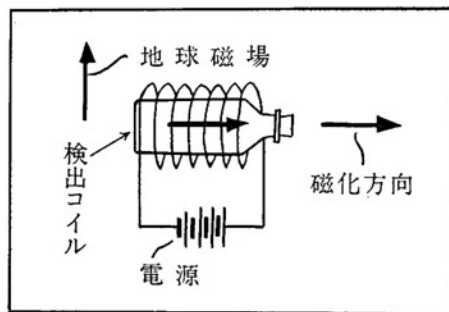
# 磁気探査

物理探査の発展の歴史を見ると 磁気探査が物理探査として人間が最初に行った技術である。すなわち 地磁気の異常分布から地下の強磁性物質 とくに磁鉄鉱床の発見に役立たせようとしたものである。

現在ではこの磁気探査は陸上のみならず 空中・海上探査などにも広く行われ 地質 地下資源の探査には欠くことのできないものとなっている。

磁気探査の対象は 地磁気の局地的異常であって これは 地殻の表層近くに分布する岩石の磁氣的性質に関連して生ずるものである。従って 地表あるいは地表付近の局地的磁気分布を測定し これの原因となっている地下の岩石の磁氣的性質を 明らかにしようとするものである。

磁気探査に用いる器械としては すでに17世紀の初めスエーデンにおいて鉱山用コンパスを作って実用化している。しかし 磁気探査に最もよく用いられるに至ったのは20世紀になって Adolf Schmidt によって作られた野外用磁力計である。現在もこの Schmidt 型乃至これの改良型の磁力計が主として地上の調査に用いられている。その後 第2次大戦中アメリカにおいて潜水艦探知のため弱磁界測定の研究が続けられ 飽和鉄心型



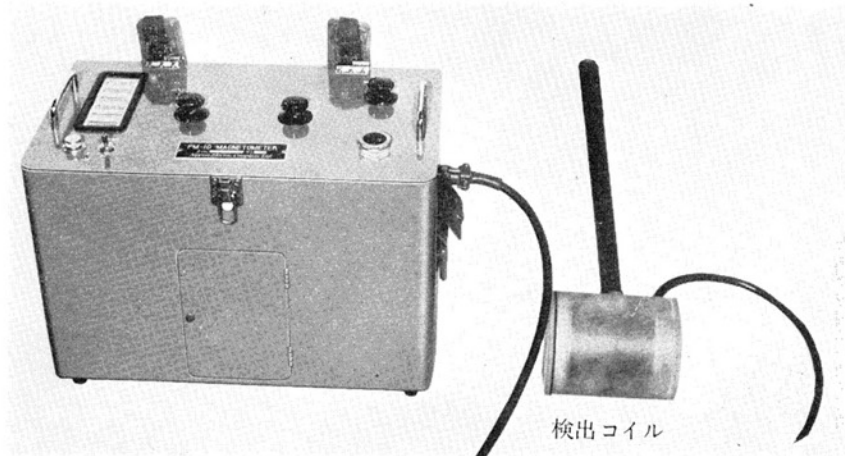
プロント磁力計(核磁力計)の原理図

磁力計を製作し これを利用して空中磁力計を完成した。

さて 磁気探査は 空中磁力計の出現によって急速な発展をとげたのであるが 最近になって 核磁力計の研究が進むにつれ さらに新しい進展が期待されるようになった。

**核磁力計**は 原子核の磁氣的性質を利用して 磁界を測る装置である。すなわち 原子核は磁気能率を有しており 従って 重力の場における Gyroscope の歳差運動と同様に 磁界のなかで歳差運動を行う。

その周波数  $f$  は磁界の強さ  $T$  に比例し  $f = \gamma T / 2\pi$  で与えられる。  $\gamma$  は磁気回転比とよばれ 核種によっ



- ← 容量 45×26×32cm
- 重量 本体・12kg
- 検出コイル・3kg
- 感度 ±10ガンマー

トランジスター プロント磁力計

て定まる物理定数である。

核磁力計は検出器に試料として蒸留水あるいは他の液体を入れ それに巻線を施し 励磁用および検出用コイルとして使用する。普通 地球磁界と大体直角の方向に 地球磁界に比較して大きな磁界を加えておいて この磁界を急に切り そのとき生ずる原子核の歳差運動によって 検出コイルに電磁誘導作用により生ずる電圧の周波数を測定して磁界を決定する。

磁気回転比 $\gamma$ は 水素の原子核では  $\gamma=2.6752 \times 10^4 \text{ sec}^{-1} \text{ gauss}^{-1}$  で たとえば 地球磁界の値が  $0.5 \gamma$  とすれば 磁力計の出力周波数は約 2,000 $\sim$  となる。このように磁界の大きさを 周波数として測定するのでその精度が高く かつ磁界の絶対値が測定できる。また 検出コイルの方向は出力電圧の大きさに影響するが 周波数は変化しないので 特定方向を選ぶ必要がない。ただし 磁気傾度が著しいところでは 出力電圧の減衰が早く 測定が困難となる場合もある。

検出器の試料に蒸留水を用いると 比較的大きい出力電圧が得やすくその減衰が小さい。また 水素の原子核の磁気回転比は大きく その値が正確に知られているので 微小磁界の測定に利用される。しかし この場合には数秒程度の測定時間を要する。航空機などによって磁界測定を行う場合には 他の試料を用いて測定時間を縮めることが研究されている。

周波数測定は水晶発振器を用いて 標準周波数を発生し 増幅器からの周波数と混合して うなり周波数を記録する方式がとられている。

核磁力計は従来の磁力計とは異なり 色々の長所を有しており 今後新しい利用面が生まれるであろう。

地質調査所では 昭和32年ごろからこの面の調査研究を行い 磁気探査の新分野を開拓しつつある。

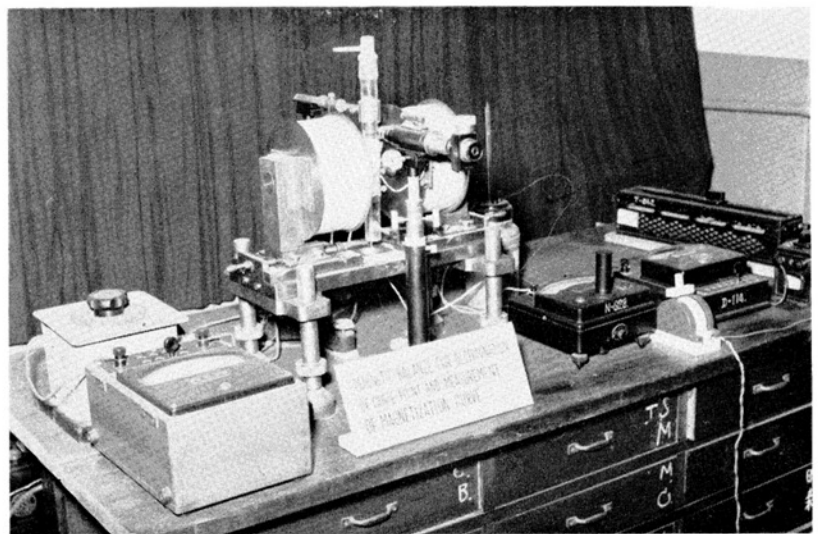
磁気探査においては 地表付近の磁気分布から地下の磁性体を推定するが これは重力探査の場合と類似の理論によるものである。ただ 磁気の場合は双極的性質をもつ点が異なっている。磁気探査においては磁性体の分布 磁化の強さおよび磁化の方向が 問題となってくる。

最近の岩石・鉱石の磁氣的性質の研究の発展とともに 岩石・鉱石の磁性は帯磁率のみならず 自然残留磁気も解明されつつあり 磁気探査においても 自然残留磁気による影響も十分考慮しなければならないことがわかってきた。このことは 磁気探査の結果を解釈する場合 不確定の要素が 多分に含まれることになるのであるが 反面地下の地質・鉱床に関する幾多の情報を提供する可能性が考えられるのである。

磁気探査の結果は 岩石・鉱石の磁氣的研究の進展とともに さらに有効な資料を与えるものとなる。

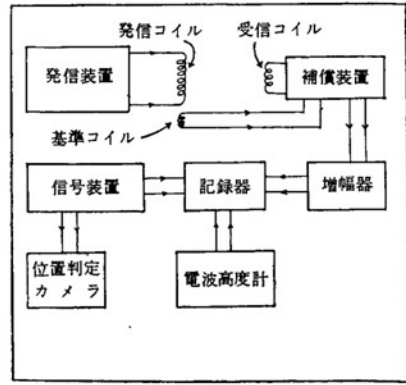


シュミット型磁力計



磁気天秤  
鉱物のキュリー点などを測定する装置

# 空中磁気および 空中電磁探査



空中電磁探査装置

## 1. 空中磁気探査

この方法は 第2次大戦後に急速に発展したものである。戦争終了とともにアメリカではこの技術を地質調査の面に向けたのである。すなわち アメリカは地質調査所に空中磁気探査の部門を設け 空中磁気図の作成を始めた。また民間にも空中磁気探査の会社ができて

いる。カナダ イギリス オーストラリア等では 国家機関あるいは民間において これらの技術をもって調査を行っている。ソ連は 広大な領土をもち未開発地域が多いので 空中磁気探査には大いに熱を入れている。現在では陸上のみならず海洋調査や南極探検にも使用されている。

空中磁気探査は 地下の磁性体を探査するもので 直接的には 磁性鉱床の探査に有力なものであるが さらに間接的には油田構造や その他の地質構造の探査に広く用いられている。

空中探査に用いられる磁力計は 飽和鉄心型であって 特殊の方向維持機構によって 常に地磁気の方

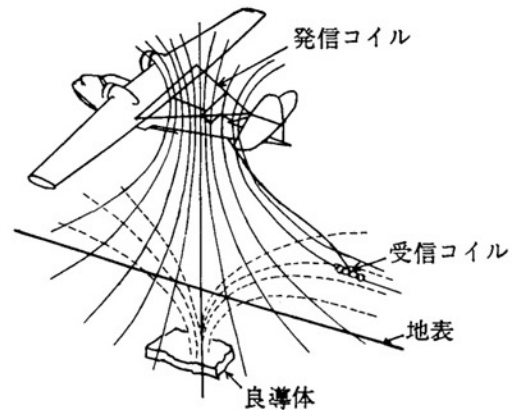
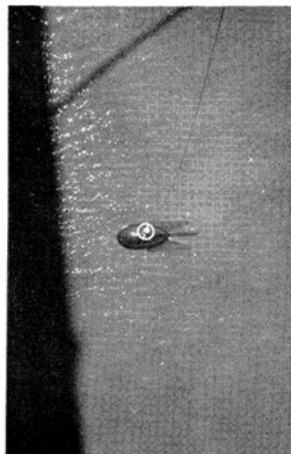
られ その全磁力の変化を連続的に記録することができる。

現在各国で用いられている空中磁力計はすべてこの型のものである。しかし 最近核磁力計の発達によって新しい型の空中磁力計が出現しつつある。わが国でもこの方式による空中磁気探査が可能になってきた。

空中磁気探査は他の空中探査に比較して高度の飛行による探査が可能である。精査の場合は対地高度 200 m 程度 概査の場合 400~1,000 m はあるいはそれ以上の高度がとられている。また この探査は地質鉱床に対し普遍性のある資料を与えるもので アメリカ カナダ オーストラリア ソ連等においては 陸域のみならず海域においても組織的な地域探査を実施している。

## 2. 空中電磁探査

空中電磁探査は 地下の良導体を探査するもので 主として金属鉱床とくに塊状硫化鉱床の探査に利用されている。この方法はアメリカ カナダ ソ連等において



空中電磁探査の原理

空中磁気探査			
対地高度	300~500m	ボン重量	2.5kg
コードの長さ	40m	コードの径	36mm
			ヘリコプターから降しているボン



空中磁気探査に使用しているシコルスキー S-25  
探査の場合は正副操縦者のほか3名の調査員が搭乗する

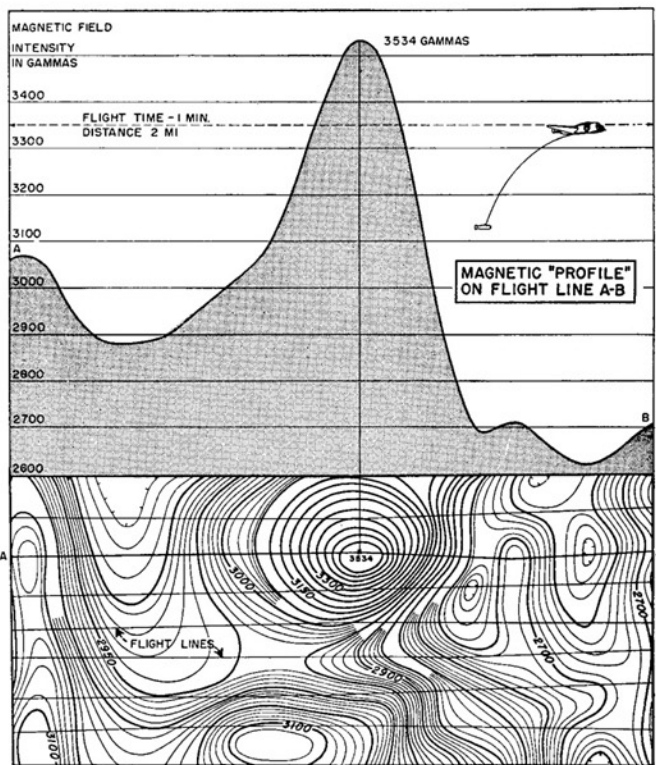
行われている。カナダにおいてはとくに活発に実施されこの10年間に幾多の磁化鉄床の大鉄床を発見している。これは2つのコイル間の相互インピーダンスはこの間にある導体によって影響されることから空中電磁探査では主として2つのコイル間のインピーダンスを測定する方法がとられている。

発信コイルを航空機につけ受信コイルを航空機の下につるす方法が普通行われている。また飛行機あるいはヘリコプター1機に2つのコイルを備え付ける方法と飛行機を2機使用して発信コイルと受信コイルを別々に装置して一定間隔で飛ぶ方式も行われている。

異なった方法としては発信コイルの代りに両端が大地に接地された長い電線に交流を流し(ソ連では15~20km程度)受信装置を航空機につけて探査することも試みられている。またAF MAG方式といって自然におこる電磁気的変動を利用する探査法も研究されている。

普通の方法では対地高度200m以内を飛ばねばならないので地形の悪い所では探査飛行が困難となる。使用される交流は周波数200~2,300サイクル程度のものである。可探深度は10~100m程度のものであろう。

空中電磁探査は良導体としての金属鉄床とくに硫化鉄床の探査に使われているのであるが探査結果を見るとしばしば多くの他の原因による異常が表われてくる。従って異常地に対しては地上で地質調査 磁気・重力等の物理探査 地化学探査 試錐等を行って鉄床によるものかどうかを区別しなければならない。ニセの異常を示す原因としては炭質粘板岩 片岩 塩分を多少含む堆積層 粘土等がある。また土壌がこれらの原因をなす場合もある。この方法は比較的高比抵抗の様な母岩内にある塊状鉄床の探査に適している。



空中磁気探査測定実例  
上……断面図 下……平面図

35年9月月例研究発表会

9月11日(月)午後1時から 本所(清ノ口)  
会議室において開催

演題

- (1) 石油・天然ガス鉄床の生成の時期  
(燃料部) 井島信五郎
- (2) 吉原鉄山付近の地質鉄床とその探査  
(鉄床部) 小村幸二郎
- (3) 最近の自然電位法の研究について  
(物理探査部) 柴藤喜平
- (4) 樺戸山地における新生界の変せん  
(企画課) 垣見俊弘・小林勇



## 放射能探査

放射能という現象が知られたのは1896年にフランス人 Henri Becquerel が彼の写真乾板がウラン塩によって黒変することを発見した時からはじまる。地学関係では1918年に Ambron さんが断層や鉱脈の存在する付近の土壌の放射能が著しく増加することを発見した。その後 試験的な測定が色々な人によって行われ またその探査も実施されるようになった。

現在 放射能探査がもっとも効果的に適用されている分野は 核原料物質探査と石油坑井に対する応用とであるが その他 金属・非金属鉱床や燃料資源等に対しても放射能探査の適用が拡大されつつある。

**岩石の放射能** 放射能探査は岩石の放射能にもとづいて行われる。岩石はすべて放射能をもっているがこれは放射性鉱物が存在しなくても 岩石を構成する鉱物中に放射性元素が微量に含まれていることによる。そして岩石の種類に応じて放射能強度がちがうのである程度まで放射能強度と 岩石の種類とを対応させることができる。

岩石中の Ra Th 含有量

岩石名	Ra ( $10^{-12}$ g Ra/g)		Th ( $10^{-6}$ g Th/g)	
	試料数	平均値	試料数	平均値
花崗岩 (Granite)	31	1.35	19	11.1
花崗閃緑岩 (Granodiorite)	2	0.41	2	1.5
閃緑岩 (Diorite)	4	0.35	4	4.8
斑岩 (Gabbro)	5	0.36	4	5.6
粗面岩 (Liparite)	1	0.90	1	9.7
安山岩 (Andesite)	6	0.42	1	0.45
玄武岩 (Basalt)	19	0.28	12	3.9
砂岩 (Sandstone)	6	0.66	1	5.4
石灰岩 (Limestone)	10	0.61	5	1.1

一般に火成岩については 酸性の岩石が放射能強度が大きく 塩基性の岩石では小さいという傾向がみとめられている。堆積岩についてはその強度は組成粒子の鉱物によるが また放射性物質が粘土質堆積岩に吸着されることも多い。

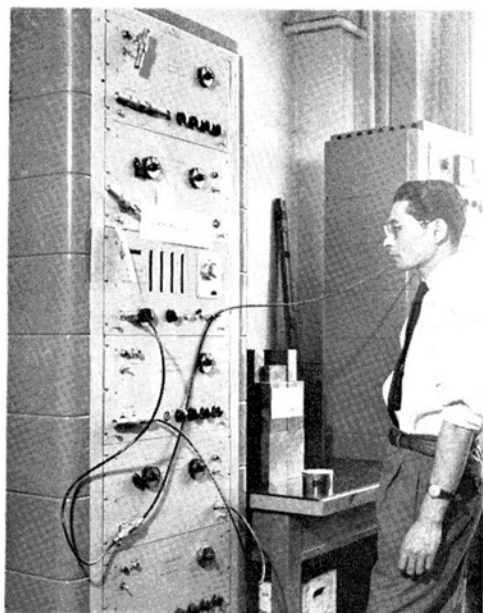
なお 核原料物質探査等に関連して岩石試料の放射能含有元素の種類やその含有量を知ることは重要である。そのための1つの方法としてシンチレーション・カウンターを利用した波高分析装置が使用されている。

これはシンチレーション・カウンターにおいては 増倍型光電管から出る電圧パルスが $\gamma$ 線のエネルギーに比例することにもとづいて 適当な電気回路と組合わせて $\gamma$ 線のエネルギー分布を測定し 元素の種類を判定するものである。この方法はまた放射能検層に対しても試みられている。

**核原料物質探査** 核原料物質の探査では 鉱床の賦存状態が必ずしも明確とはいえない現状なので 原則的には まず 鉱床賦存の可能性のありそうな地域を広く探査して 放射能異常地域を発見するための広地域概査が行われ それにもとづいて特定の地域に対する局地探査が行われる。広地域探査のためにはエア・ボーン探査やカー・ボーン探査が行われる。

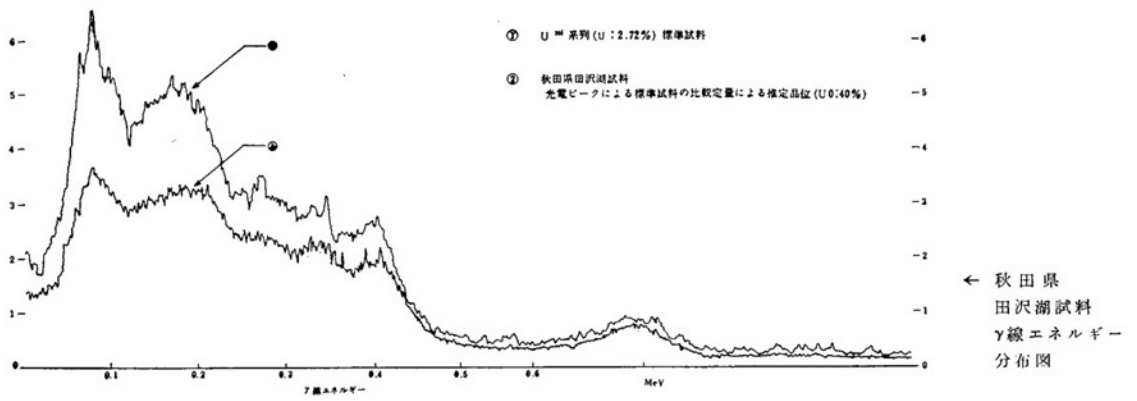
### エア・ボーン放射能探査 (空中放射能探査)

組織的なエア・ボーン探査は 1950年頃からアメリカ・カナダ・イギリスなどで始められるようになった。探査は大別して 中型の飛行機に大型のシンチレーション・カウンター (直径4~5" 厚さ2"程度の NaI (TI)



波高分析装置

岩石・鉱石試料のウラン・トリウム・ラジウム・カリウムの迅速な分析に使用する ガンマ線スペクトロメータ



結晶がよく用いられる) や対地高度計 位置判定カメラ等を搭載して 放射能強度や対地高度の値を連続自記させて広地域を迅速に探査するものと セスナ 180 やパイパー スーパーカブのような軽飛行機にシンチレーション・カウンターを搭載して できるだけ低空で限られた地域を綿密にしらべる探査の 2 つに分けられる。

後者の場合にはヘリコプターも有効に使用されている。空中探査では対地高度によって 放射能強度が変化するために 一般には高度に対する補正が必要であることと位置判定がむずかしい等の困難性があるが 迅速に広い地域の探査を実施して 放射能異常地帯を探知することができる。

わが国では 1955 年以来広地域概査が 地質調査所によって実施され また局地探査としては 原子燃料公社によって ヘリコプターを使用して 鳥取県下で試験的に実施された。

**カー・ボーン放射能探査 (自動車放射能探査)**

カー・ボーン探査は自動車 (ジープ等の四輪駆動車が普通に用いられる) に高感度シンチレーション・カウンターを搭載して 走行しながら連続測定を行う。

エア・ボーンに比べて 高度に気をを使う必要がなくて 随時に地上で放射能異常地帯をしらべられる利点があるが 道路以外へ乗り入れられないのが欠点である。

探査に当っては シンチレーション・ヘッドを両側に付けて露出のどちら側を通過しても条件が同じになるようにしたり あるいは鉛遮へいを施して 特定の方向のみ放射能を測定するようにする方法もある。

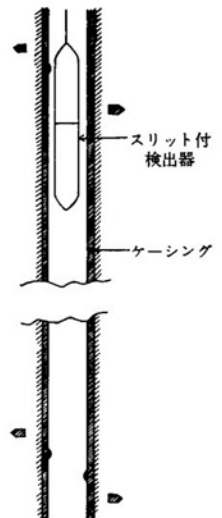
また 原子燃料公社では 放射能強度の大きな方向を指示する U スコープを使用している。

地質調査所では 1955 年以来カー・ボーン探査を実施しているが 現在 直径 5'' 厚さ 2'' のクリスタルのシンチレーション・ヘッド 1 個をそなえた探鉱器を搭載し 速度 20km/H 程度で行われている。

連続的に記録される記録紙上には 200m ごとの走行距離が自動的に記入され また スイッチを押すことに



エア・ボーンおよびカー・ボーン探査に使用されているシンチレーションヘッドとその内部にあるクリスタル (直径 5'' 厚さ 2'') と光電子増倍管



RI をめぐるしとする地層収縮測定 の原理

よって岩石露出 石垣等の計数に影響する因子や 丁字路橋 役場等の位置をきめる因子がマークされる。 探査に際してはなるべく岩石露出の多い山地を通ることが必要である。

局 地 探 査 は放射能強度分布を正確に定めるために行われる。 一般にはこまかい測線を設けて実施される。 さらに限定された場所に対してピット等による綿密な探査—地点探査—も行われる。 これらの場合測定器としては 軽量のG—M計数管や小型のシンチレーション・カウンターが使用される。

### RI による探査法

最近 放射性同位元素 (RI) の利用が盛んになって地質 探鉱方面にも利用されるようになった。 現在までのこの方面の利用のおもなものとしては 次のようなものがあげられる。

伏 流 水 の 調 査 工業用水や地下水関係において水路探査や流水量測定に比較的多く使用されている。

この場合岩石による吸着 水による沈殿 半減期 安全性等が考えられねばならない。 一般には Br. I. P. 等の RI が使用されているようである。

堆 積 物 の 移 動 洪水による礫の移動や港湾の防波堤 築港の基礎資料をうる目的で 海岸の砂の移動をしらべるための調査等が行われている。 わが国では利根川の洪水調査に  $^{60}\text{Co}$  が用いられ 苫小牧港において  $^{65}\text{Zn}$  を使用して調査が行われた。

土 壌 密 度 の 測 定 地面に穴を掘って適当な装置により中性子源を使用して 土壌の含水量を測定することと平行して  $^{60}\text{Co}$  による土壌密度の測定が 主としてハイウェーや飛行場建設等の土木関係で行われている。

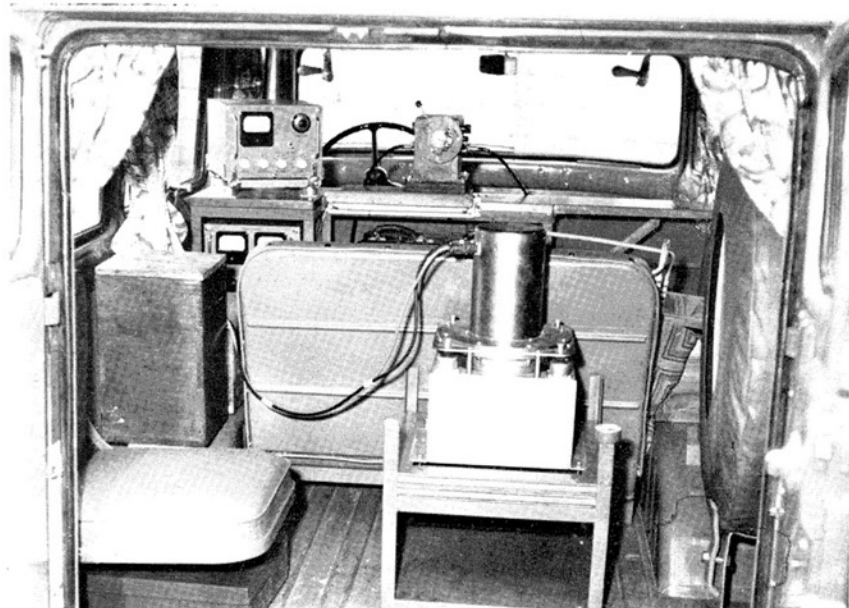
原理は穴に入れた  $^{60}\text{Co}$  からの  $\gamma$  線が周囲の土壌に散乱して その一部は G—M 計数管 により計数される。 計数と密度の関係は 既知密度の試料によって確かめておき 計数からただちに密度が知られるようになっている。

地 盤 沈 下 調 査 最近 新潟市の地盤沈下調査の一環として地層収縮の測定が RI を使用して行われた。 この場合 地層に打ち込んだ  $^{60}\text{Co}$  1mc を入れたためじると 固い地盤に固定した鉄管につけたためじりし  $^{60}\text{Co}$   $10\mu\text{c}$  との間の深さの変化の測定を行った。

今後 RI による探査は多方面に利用の途が開けるものと考えられるが この種の探査においては一般に野外で使用されるので 人畜に対する安全性については 十分考慮する必要がある。



位置判定カメラによって撮影された空中写真



純国産の探査用測定器を搭載した自動車(三菱ウリスジープ CJ3B—J11)

# 物理検層

**検層 (Well Logging)**とは 地層の諸特性を深度に関して記録する操作の総称である。

**電気検層**は 主要な検層技術の1つであり 主として比抵抗と自然電位の測定からなっている。このほか天然放射能または地層への中性子放射によって生ずる二次放射能を測定する**放射能検層**、地層をつたわる音波の速度を測定する**音波検層**等がある。電気および音波検層は裸坑のみでしか実施できぬが 放射能検層はケーシング挿入後においても測定しうる。これらの検層法は地層の対比のみならず 地層の性質の算定のためにも行われるが 地層の性質算定の補助資料をうるために坑井方位測定 (directional surveys) 地層傾斜測定 (dipmeter surveys) 温度測定 (temperature surveys) 孔壁コア採取器 (side-wall sampling) drill-stem test および formation tester 等の測定が行われる。

## 1. 電気検層

電気検層は検層技術の中核をなすもので歴史も最も古く S. P. 曲線と比抵抗曲線の作成から成立っている。S. P. 曲線は電気化学的に活性な頁岩層と不活性な砂その他の浸透性地層の判別 および間隙水の性質の算定に

	速度	S.P. 比抵抗	中性子
頁岩			
含ガス 砂層			
含石油 砂層			
含水 砂層			
頁岩			

石油ガス地帯でみられる模式的構造に対する各種の検層図の概念図

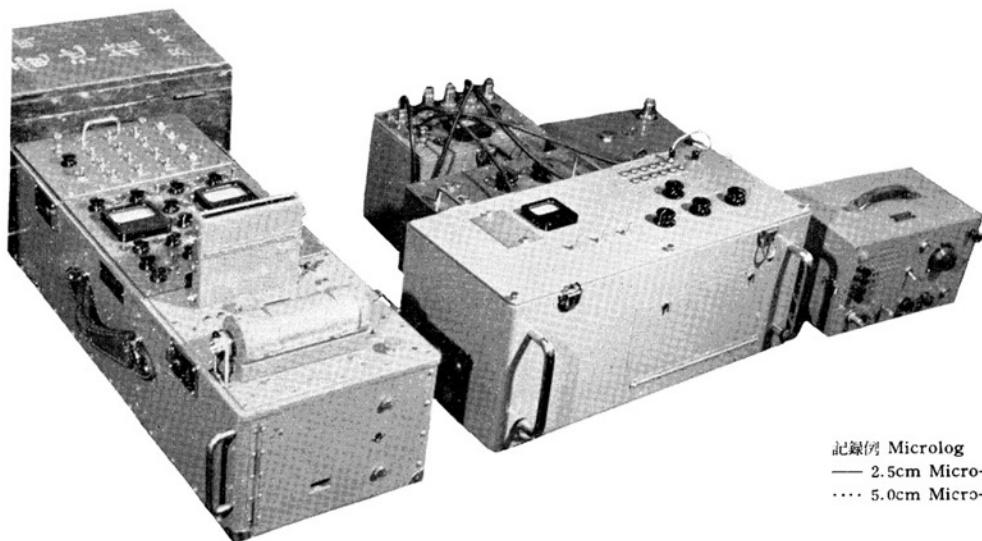
用いられ 比抵抗曲線は地層比抵抗係数 従って孔隙率および液体飽和度の算定に役立つものである。

比抵抗検層には比較的大きな容積を対象とする方法と坑壁近傍の比較的小さな容積を対象とする方法とがある。

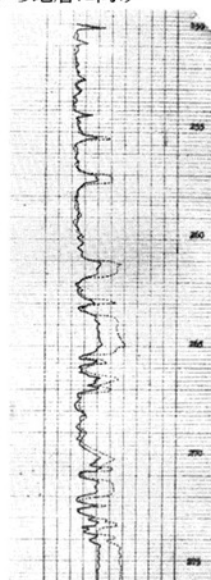
前者に属するものとしては 通常方式の比抵抗検層であるノーマル・ラテラル方式の外 Laterolog の如く指向性を特色とするもの および電磁誘導を利用した誘導検層があり 対象とする地層の比抵抗および配列 使用泥水の性質等によりおのおの特色が発揮される。後者に属するものは接触検層である。

通常方式のものは薄層の算定に適せず とくに地層間および地層・泥水間の比抵抗差が大きい場合には薄層の正確な算定はできない このような薄層の算定のために考案されたものが Laterolog 等であり 印加電流が薄板状をなすよう特殊な回路が付加されている。塩分の高い泥水で掘さくした Hard Formation の検層では大きな役目を果たすものである。

以上2種の比抵抗検層は 何れも電極から地層に向け



電気検層記録装置



記録例 Microlog  
 — 2.5cm Micro-normal  
 ..... 5.0cm Micro-normal

ノーマル方式では検出し難い非常に薄い層も検出される

電流を流すが 誘導検層は流電電極をもたず感応電流によって探査する。

指向性をもつ感応電流を用いた誘導検層は隣接層および泥水柱の影響を余りうけないので 如何なる場合の薄層の算定にも適用される。また 流電電極を必要としないため Oil-base 泥水の坑井および液体のない坑井の比抵抗検層に役立つ。接触検層のうち Microlog は泥壁の影響をかなりうけるが そのために浸透性地層の判別に役立つ Microlaterolog は 泥壁の影響をほとんど受けず 浸入領域とくに flushed zone の比抵抗の決定従って地層係数乃至孔隙率の算定に役立つものである。

## 2. 放射能検層

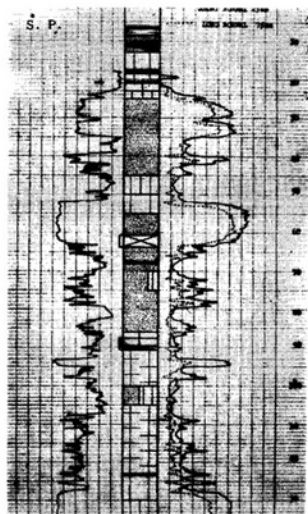
放射能検層には地層のもつ天然放射能を測定するガンマ線検層と 中性子照射を被った地層から誘発される放射能を測定する中性子検層とがある。

天然の放射性物質としてはウラン・トリウム系の放射性元素とカリウム放射性同位元素 $^{40}\text{K}$ とがある。

ウラン・トリウム鉱床 放射性元素を比較的多量に含む火成岩類 火山灰は著しく強い放射能を示す。他方放射性塩類の濃度が比較的高い頁石・粘土も 砂・石灰岩等に比べると相対的に高い放射能をもつため 放射性鉱床 カリウム鉱床の探査のほか 岩層の識別 とくに粘土質地層の決定にも用いられる。

炭層の決定にガンマ線検層が利用されるのは 石炭層の放射能が著しく弱いためである。

中性子源より「速い中性子」を照射すると 地層中の水素 珪素 ナトリウム 塩素等の原子と衝突し これらの原子に「速い中性子」は「遅い中性子」となって捕獲される。その結果 原子は「捕獲ガンマ線」を放出するが これら原子のうち質量が中性子に近い水素原子はもっとも主要な役割をはたす。このため中性子検層は水素密度検層とも呼ばれる。中性子源の近くの地層が多量の水素原子を含むほど 検出器に達する捕獲ガンマ線の減衰は著しくなる。粘土分を含ませ地層では水素原子は 空隙水および油のなかに認められるため 中



S. P. 比抵抗検層図

←このような電気検層図は 微細構造の検出・層厚の決定地層の対比等に利用されているほか地層の物理的性質（孔隙率・ガス・石油・水の飽和率）等の推定にも役立つことができる。主な対象は石油・ガス探査のほか 地下水・温泉・地熱・鉱床・土木等のきわめて広い範囲にわたって利用されている。

性子検層の計数率は 主として地層の孔隙率に左右されることとなる。

しかしながら 空隙粘土は多量の水素原子を含有するため 粘土は有効孔隙率に関連のない計数率を生ずる。

中性子検層の計数率は粘土分の外 岩石を構成する鉱物の化学組成や坑井条件によって影響をうける。堆積岩地帯では前者は無視しうが 坑井条件のうち坑径は粘土含有量と共に重要な影響を与える。

## 3. 音波検層

最も新しい検層技術であり 岩石内の空隙乃至粒子の大きさより 大なる波長をもつ音波源を使用する1種 の速度検層である。すなわち 5~10/秒の割合で音源からパルスを放射し 地層を通して2個の受振器にパルスの到達する時間差を測定し 2個の受振器間にある地層の音波速度を求めらる。

地層の音波速度は 岩石充填物の弾性的性質・地層の孔隙率・液体含有量および被圧力によって定まるので 音波検層は 未固結地層に対しては 圧密不足度 粘土分および液体含量について補正すれば 孔隙率の算定に役立つ。Hard Formation に対しては 速度は主として 液体含有量によって左右されるため 孔隙率の算定に音波検層のはたす役割は大きい。

音波検層は 新しい技術であり 今後の発展が期待されているが わが国ではいまだ行われていない。